



## Ricerca di Sistema elettrico

# Metodi geostatistici per l'elaborazione delle mappe di illuminamento naturale per il territorio italiano

*F. Spinelli, D. Iatauro*

## METODI GEOSTATISTICI PER L'ELABORAZIONE DELLE MAPPE DI ILLUMINAMENTO DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE PER IL TERRITORIO ITALIANO

Francesco Spinelli, Domenico Iatauro (ENEA)

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto. Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Metodi per la verifica delle disponibilità di luce naturale e per la stima dei requisiti energetici per illuminazione naturale in edifici nZEB - Metodi geostatistici per l'elaborazione delle mappe di illuminamento.

Responsabile del Progetto: ing. Domenico Iatauro

## Indice

<b>SOMMARIO / SUMMARY</b> .....	4
SUMMARY .....	4
<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	6
<b>2. METODI DI INTERPOLAZIONE SPAZIALE</b> .....	7
<b>3. I MODELLI DI INTERPOLAZIONE SPAZIALE ANALIZZATI</b> .....	9
3.1 METODO DELLA MEDIA MOBILE .....	10
3.2 METODO DELL'INTERPOLAZIONE POLINOMIALE MEDIANTE OTTIMIZZAZIONE AI MINIMI QUADRATI .....	11
3.3 METODO DELL'INVERSO DELLA DISTANZA (INVERSE DISTANCE WEIGHTED) .....	12
3.4 METODO DEI POLIGONI D'INFLUENZA (NATURAL NEIGHBOUR ANALYSIS) .....	13
3.5 METODI GEOSTATISTICI: KRIGING.....	15
<b>4. APPLICAZIONE DEI DIVERSI MODELLI: LE MAPPE D'ILLUMINAMENTO NATURALE</b> .....	20
<b>5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b> .....	32
<b>SIGLE E ABBREVIAZIONI</b> .....	33
<b>BIBLIOGRAFIA / REFERENCES</b> .....	34
WEB REFERENCES.....	34

## Sommario / Summary

L'uso di energia elettrica dedicato al servizio d'illuminazione artificiale degli edifici, in ambito EPBD (*Energy Performance Building Directive*) viene attualmente valutato attraverso l'applicazione della UNI 15193:2017 "*Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting*", recepita come norma tecnica nazionale. Alcuni studi condotti negli anni precedenti hanno evidenziato i limiti del metodo di calcolo, implementati nella norma, dovuti soprattutto all'assenza di dati climatici riguardanti la disponibilità di luce naturale relativi alle località in esame. ENEA, nel corso delle attività della Ricerca di Sistema, propone un metodo di calcolo *alternativo*, che utilizza l'illuminamento diffuso esterno (*naturale*) sul piano orizzontale quale parametro climatico per stimare la disponibilità di luce diurna negli edifici e, conseguentemente, determinare i fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione artificiale. Nella corrente annualità, partendo dagli anni tipo (AMTIN) ricavati su 243 località italiane sono state prodotte mappe degli illuminamenti naturali globale e diffuso (orizzontali), per differenti intervalli orari. Poiché l'andamento spaziale e temporale delle diverse grandezze d'interesse (illuminamento globale, diffuso ecc.) richiede l'applicazione di opportune metodologie di interpolazione, per l'estensione dell'attività svolta, è stato previsto uno studio di approfondimento dei metodi geostatistici utilizzabili per l'elaborazione delle mappe di illuminamento. Sono di seguito descritte, in sintesi, alcune delle principali metodologie di interpolazione spaziale di dati, evidenziando, mediante un confronto applicativo, quella risultata più opportuna per l'elaborazione delle mappe di daylight ad integrazione del sito Solaritaly ([www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it))

### Summary

*The energy need for the artificial lighting service in buildings, in the framework of EPBD (Energy Performance Building Directive) is currently assessed through the application of UNI 15193: 2017 "Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting", implemented as a national technical standard. Several studies conducted in previous years have highlighted the limits of the calculation method, implemented in the standard, not based on specific daylight data of the sites considered. ENEA, in the framework of Italian Research programme "Ricerca di Sistema Elettrico", has proposed an alternative calculation method, in which the diffused outdoor illuminance on the horizontal plane, is used as a climate parameter to estimate the availability of daylight in buildings and, consequently, to evaluate the energy needs for artificial lighting. In the current year, starting from the typical years (AMTIN) obtained for 243 Italian locations, maps of global and diffused outdoor illuminance were produced, for different time profiles. Since the definition of the spatial and temporal trend of environmental variables or metrics requires the application of appropriate interpolation method, in this work has been carried out, an in-depth analysis of the geostatistic methods, to be used to develop Italian daylight maps. Some of the main methodologies for spatial analysis interpolation are described below, highlighting, by means of applications and comparisons, the most appropriate method selected for the processing of daylight maps to be included in the Italian database Solaritaly. ([www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it))*



## 1. Introduzione

Gli usi elettrici per l'illuminazione artificiale sono destinati ad assumere sempre più importanza, in termini percentuali, rispetto al fabbisogno totale di energia negli edifici, in particolare per quelli nZEB. L'attuale quadro normativo, in accordo con la direttiva EPBD (*Energy Performance Building Directive*) fa riferimento per il calcolo, alla norma tecnica UNI EN 15193:2008 -Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione, standard orientato verso un calcolo standardizzato e solo in parte adatto a valutare le prestazioni di illuminazione naturale di edifici esistenti e di nuova costruzione.

Tuttavia negli ultimi anni, diversi studi condotti (anche) dall'ENEA, hanno evidenziato alcuni limiti intrinseci nel metodo di calcolo proposto dalla norma, che sembra portare ad una sovrastima del fabbisogno richiesto. E' evidente infatti, che le potenzialità di risparmio energetico possono essere efficacemente conseguite solo in presenza di strumenti in grado di prevedere con sufficiente accuratezza le prestazioni del sistema edificio-impianto, soprattutto nella declinazione nZEB<sup>1</sup> dei requisiti energetici degli edifici, adottata in Europa e nei singoli Stati Membri.

La necessità avvertita dall'ENEA di migliorare il metodo di calcolo previsto dalla norma EN 15193:2007 "Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting", ha portato, nell'ambito della Ricerca di Sistema, alla produzione degli anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale relativi a 243 località italiane, in modo da tener conto, con maggiore attendibilità, dell'apporto dell'illuminamento naturale al bilancio energetico dell'edificio.

Partendo dall'analisi di differenti modelli di efficacia luminosa infatti, è stato possibile convertire i livelli d'irradiazione solare ( $W/m^2$ ) in livelli di illuminamento (lux), e con l'utilizzo del nuovo modello messo a punto, allestire una banca dati di anni tipici per l'illuminamento naturale delle località italiane (AMTIN). Il numero di località per le quali produrre l'anno tipico è stato individuato in modo tale da mappare con uniformità il territorio italiano, e con densità adeguata sotto l'aspetto della continuità territoriale del fenomeno; inoltre sono state delle zone maggiormente interessanti dal punto di vista antropico. Le curve di disponibilità di daylight costruite per le varie località italiane permetteranno di estendere quanto già disponibile per la radiazione solare con il sito Solaritaly, e consentire il calcolo dell'illuminamento naturale con modalità analoghe. In definitiva, l'aggiornamento dei contenuti, l'aggiunta delle nuove funzionalità e il miglioramento della fruibilità concorrono insieme a far sì che il database Solaritaly possa proporsi come piattaforma web di riferimento in Italia per la caratterizzazione del territorio nazionale sotto il profilo della radiazione solare e dell'illuminamento naturale.

Per l'estensione dell'attività svolta è previsto uno studio di approfondimento delle metodologie di interpolazione, utilizzabili per l'elaborazione delle mappe di illuminamento.

La redazione di mappe a partire da dati puntuali si ottiene infatti, con l'ausilio di un opportuno metodo interpolante: in tutti i punti (pixel) della mappa, in cui il valore della grandezza rappresentata non è noto, questo viene stimato a partire dai dati disponibili spazialmente vicini. Chiaramente quanto più grande e uniforme è l'infittimento dei dati disponibili, meno incerte saranno le stime che si otterranno. Poiché

---

<sup>1</sup>Nearly Zero Energy Buildings: edifici a consumo energetico quasi nullo

l'illuminamento naturale varia con gradualità sulla superficie terrestre, la disponibilità dei dati climatici per 243 punti geografici è adeguata a rappresentare attendibilmente il fenomeno sull'Italia.

E' importante sottolineare che il risultato finale dipende sensibilmente dalla scelta del metodo interpolante. Infatti, esistono numerosi metodi, nessuno dei quali si rivela il migliore in tutte le circostanze. Riveste quindi rilevante importanza lo studio volto all'individuazione e adattamento, di volta in volta, del metodo più idoneo.

## 2. Metodi di interpolazione spaziale

Uno dei limiti più evidenti della norma attuale sta nel fatto che per valutare la disponibilità di luce naturale per una data località si ricorra alla latitudine quale *unico* parametro caratteristico delle condizioni geografiche e climatiche. Il metodo alternativo concepito dall'ENEA — una sua versione preliminare è già sviluppata si basa su una più accurata caratterizzazione climatica del sito in quanto utilizza quale parametro di riferimento l'illuminamento diffuso esterno sul piano orizzontale.

Come già accennato in precedenza la corrente annualità è stata dedicata alla produzione di mappe dell'illuminamento naturale per il territorio italiano, pensate come strumento geografico complementare a quello degli anni tipo: questi infatti descrivono il territorio in maniera puntuale (ovvero "per punti": le singole località); quelle lo mostrano invece in maniera continua, permettendo di apprezzare l'andamento superficiale del parametro studiato.

Perché le mappe siano utili, occorre stabilire una corrispondenza corretta fra i pixel e le entità fisiche che essi vogliono descrivere. Una mappa geografica che voglia rappresentare l'andamento di una grandezza sul territorio viene costruita assegnando ad ogni pixel il valore (della grandezza) che gli compete in base alle coordinate geografiche corrispondenti. Però nella realtà accade quasi sempre che siano noti i valori per un insieme limitato di località, che corrisponde a una frazione più o meno piccola della totalità dei pixel; e non è nemmeno detto che esse si dispongano uniformemente sul reticolo dell'immagine da formare né che coincidano sempre esattamente con le intersezioni delle righe con le colonne.

Cionondimeno, è quasi sempre possibile costruire una mappa georeferenziata che ne riproduca con plausibilità l'andamento continuo spaziale (più correttamente: superficiale), in quanto esistono numerose metodologie d'interpolazione geografica per "popolare" comunque tutti i pixel dell'immagine a partire da quelli noti.

Comprensibilmente, qualunque metodo interpolante sarà tanto più efficace quanto più numerosi saranno i dati di partenza e più uniforme essi si disporranno all'interno della matrice dei pixel. Una mappa geografica che voglia rappresentare l'andamento di una grandezza sul territorio viene costruita assegnando ad ogni pixel il valore (della grandezza) che gli compete in base alle coordinate geografiche corrispondenti. Però nella realtà accade quasi sempre che siano noti i valori per un insieme limitato di località, che corrisponde a una frazione più o meno piccola della totalità dei pixel; e non è nemmeno detto che esse si dispongano uniformemente sul reticolo dell'immagine da formare né che coincidano sempre esattamente con le intersezioni delle righe con le colonne. Cionondimeno, è quasi sempre possibile costruire una mappa georeferenziata che ne riproduca con plausibilità l'andamento continuo spaziale (più correttamente: superficiale), in quanto esistono numerose metodologie d'interpolazione geografica per "popolare" comunque tutti i pixel dell'immagine a partire da quelli noti. Comprensibilmente, qualunque metodo

interpolante sarà tanto più efficace quanto più numerosi saranno i dati di partenza e più uniforme essi si disporranno all'interno della matrice dei pixel.

A tal fine è stato quindi necessario analizzare e selezionare una opportuna metodologia di interpolazione spaziale, che consentisse di estendere all'intero territorio nazionale opportuni valori di daylight, partendo dalle località per le quali erano disponibili dati di illuminamento, ottenuti mediante l'applicazione dei modelli di calcolo precedentemente descritti. (Reports ENEA Ricerca di Sistema Elettrico 2015/124, 2016/257, 2017/139). Le metodologie analizzate, come descritte nei successivi capitoli, appartengono a quelle più comunemente utilizzate nell'ambito dell'analisi spaziale di grandezze climatiche e ambientali.

Le tecniche di interpolazione spaziale sono procedure di stima che consentono di valutare i valori assunti da una determinata grandezza su un dominio continuo (superficie, volume) a partire dai valori noti (calcolati o misurati) in alcuni punti (distribuzione discretizzata). Il risultato dell'*interpolazione* spaziale è quindi una superficie,  $f(x,y)$ , che rappresenta i valori assunti dalla grandezza nello spazio. La ricostruzione dell'andamento spaziale della variabile in esame, può chiaramente comprendere anche punti al di fuori delle aree coperte da valori noti: in tal caso è corretto parlare di estrapolazione.

L'interpolazione può essere effettuata globalmente, considerando tutti valori noti nel dominio di interesse, oppure localmente, considerando degli opportuni intornoi dei valori già definiti.

Le differenti metodologie, che affrontano il problema mediante approccio numerico (ci sono anche metodi grafici), possono essere sostanzialmente distinte in due grandi gruppi:

- **Metodi Deterministici**
- **Metodi Geostatistici**

I metodi deterministici considerano il legame fra punti vicini in funzione di una legge i cui parametri hanno significato fisico. Tra questi ricordiamo:

- Metodo della Media mobile
- Inverso delle distanze (Inverse Distance Weighted-IDW),
- Interpolazioni Polinomiali ( Spline).
- Poligoni di influenza (Nearest Neighbour Analysis-NNR)

In generale, tali metodi, non considerano le proprietà statistiche dei punti misurati, ma assegnano un valore univoco, alla funzione in esame, in virtù delle variazioni di parametri di tipo fisico, nel dominio di studio. Ciò implica sufficienti conoscenze sulla superficie da modellare. Altro aspetto rilevante è che essi non effettuano stime di errore sui risultati ottenuti.

I metodi geostatistici (kriging) si basano invece sulla misura dell'autocorrelazione spaziale dei valori, prescindendo dal possibile significato fisico, ed includono una valutazione dell'errore di previsione.

La Geostatistica, infatti, studia i comportamenti delle variabili, le loro auto e mutue correlazioni spaziali, la loro struttura, ne estrae le regole secondo dei modelli coerenti e le usa per effettuare le operazioni che sono richieste per dare soluzione ai problemi specifici. I metodi della Geostatistica sono applicabili in tutti i campi delle scienze applicate in cui i fenomeni di studio sono caratterizzati dal carattere di spazialità. Tra questi campi, in relazione alle applicazioni registrate nell'ultimo decennio, si possono citare: le scienze geologiche



e minerarie, l'idrologia, l'idrogeologia, la pedologia, la geotecnica, la geofisica, il telerilevamento, la climatologia, la meteorologia, l'oceanografia, le scienze forestali, la zoologia, la medicina, scienze ambientali in genere, etc. (G. Raspa, Geostatistica Applicata)

I metodi geostatistici sono sostanzialmente rappresentati dall'applicazione del Kriging che include, in effetti, una famiglia di procedure geostatistiche basate sull'analisi della correlazione spaziale tra i valori misurati. Tra le varie ricordiamo:

- Kriging Semplice (SK)
- Kriging Ordinario (OK)
- Universal Kriging
- CoKriging ( geostatistica multivariata)

L'approccio probabilistico consente quindi di ottenere una caratterizzazione spaziale o temporale, di grandezze fisiche, climatiche e ambientali, facendo del kriging un rilevante strumento per l'analisi spaziale di dati di misura in molteplici campi applicativi.

L'ampia varietà di procedure di kriging, richiede, inoltre, una scelta oculata di quella più adatta al contesto in esame. Nel successivo capitolo, saranno meglio descritte le assunzioni alla base del Kriging ordinario, applicato per l'elaborazione delle mappe dell'illuminamento naturale in Italia.

Per quanto riguarda le differenti versioni applicative del kriging, date le rilevanti implicazioni analitiche richieste dal calcolo, si rimanda ad una trattazione più approfondita dell'argomento presente nei testi di riferimento citati la bibliografia.

### 3. I modelli di interpolazione spaziale analizzati

Come detto in precedenza, affinché siano utili, le mappe devono anche essere *georeferenziate*, ossia: note le coordinate geografiche di un luogo assegnato, deve potersi determinare la posizione del pixel che vi corrisponde. Il fatto è che al generico luogo geografico non corrisponde quasi mai un pixel preciso, con i numeri di riga e colonna *interi*, e dunque se si vuole ricavare dalla mappa il valore della grandezza (la radiazione) per qualsivoglia luogo geografico, occorre effettuare un'interpolazione fra più pixel vicini.

Non esiste un metodo univoco per interpolare, occorre fare delle ipotesi sull'andamento della grandezza rappresentata fra un pixel e l'altro e sono pure coinvolti concetti di geostatistica.

Qualunque sia il metodo, occorre scegliere preventivamente i punti noti che vengono coinvolti nel calcolo. Solitamente si scelgono tutti quelli che si trovano in una regione di estensione opportuna che circonda il punto da calcolare. Per la maggior parte dei metodi la funzione per il calcolo avrà, in generale, la forma di una "media pesata" del tipo seguente:

$$v = \sum_{i=1}^N w_i v_i$$

in cui:

$v$  è il valore da calcolare;

$v_i$  sono i valori noti di alcuni punti in un opportuno intorno

$w_i$  sono i “pesi” che nel calcolo sono attribuiti ai valori  $v_i$ ; tali pesi dipenderanno dalle distanze dei punti

noti; varrà per essi:  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$

Mediante l’interpolazione applicata si stimano opportunamente i coefficienti da assegnare ai “pesi” da cui dipenderà il valore di stima della grandezza ricercata.

Tra le varie metodologie disponibili per l’interpolazione, in questo lavoro sono stati considerati e confrontati i seguenti metodi:

1. **Media mobile**
2. **Interpolazione polinomiale (lineare, quadratica, grado n) con i minimi quadrati**
3. **Inverso della distanza (Inverse Distance Weighted)**
4. **Poligoni d’influenza (Natural Neighbour Analysis) pesati in base alle aree di interferenza di Sibson (poligoni di Thiessen, tassellatura di Dirichlet, ecc)**
5. **Kriging (Metodi Geostatistici)**

Vale inoltre la pena di menzionare, tra i principali metodi disponibili, anche quello delle diverse versioni delle Spline, di cui si farà solo cenno in seguito, nonché i metodi che utilizzano le Radial Basis Functions (RBF), sui quali non ci si soffermerà ulteriormente.

Vengono di seguito descritti, in sintesi, i 5 differenti metodi considerati per l’elaborazione delle mappe di illuminamento naturale.

### 3.1 Metodo della Media mobile

Sicuramente tra i più semplici, tra i metodi deterministici, il valore del punto è dato dalla media degli  $n$  valori nell’intorno del punto di interesse, contenuti in una finestra di area circolare o rettangolare centrata nel punto incognito. Fig

$$E(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N}$$

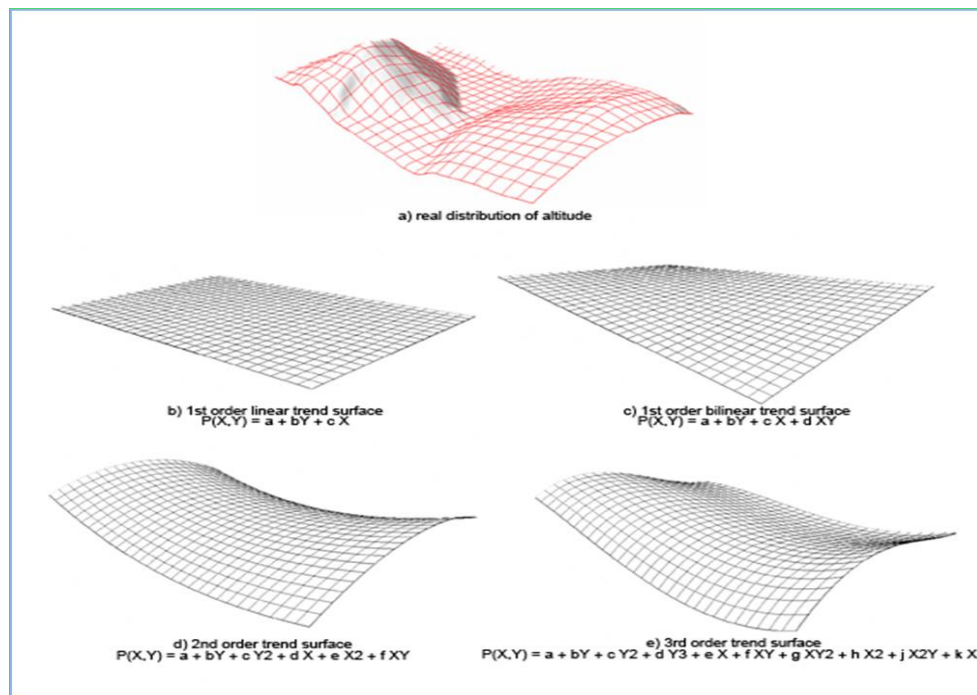
in cui  $E$  è la grandezza da interpolare (in questo studio: uno qualsiasi degli illuminamenti naturali),  $X$  e  $Y$  sono opportune coordinate geografiche metriche funzioni della posizione (riga, colonna) dei pixel e  $E_i$  sono i valori noti degli  $N$  punti vicini considerati nella media. La stima dei coefficienti (pesi) non dipende né dalla distanza del punto rispetto agli altri considerati all’interno dell’intorno, né dai valori assunti dalla variabile

nei punti stessi: il metodo infatti assume come ipotesi l'isotropia della funzione in esame nel dominio di studio.

### 3.2 Metodo dell'interpolazione polinomiale mediante ottimizzazione ai minimi quadrati

Nell'applicazione del metodo dell'interpolazione polinomiale, i valori di una determinata grandezza in esame nei punti incogniti, vengono valutati ipotizzando una funzione data da un polinomio di grado opportuno. Tale funzione, in generale, rappresenterà una superficie nel dominio passante per i punti a valore noto (metodi di lagrange) o la superficie che meglio approssima (minimizzazione ai minimi quadrati) la distribuzione dei punti noti.

La figura seguente mostra possibili funzioni polinomiali di diverso grado:



Fonte: [www.spatial\\_dist\\_an\\_TrendSurf](http://www.spatial_dist_an_TrendSurf).

Negli esempi che saranno mostrati in questo rapporto si è ricorsi al polinomio interpolante di secondo grado nelle coordinate geografiche:

$$E(X, Y) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3X^2 + c_4XY + c_5Y^2$$

in cui  $E$  è la grandezza da interpolare (uno qualsiasi degli illuminamenti naturali),  $X$  e  $Y$  sono opportune coordinate geografiche metriche funzioni della posizione (riga, colonna) dei pixel e infine  $c_0, c_1, \dots, c_5$  sono parametri da stimare. Solitamente i valori dei coefficienti del polinomio sono stimati per regressione lineare

a partire dai valori dei punti noti, ricorrendo al criterio dei minimi quadrati (*Ordinary Least Squares*), che consiste nel rendere minima la quantità:

$$W = \sum_{i=1}^N [E_i - E(X_i, Y_i)]^2$$

ovvero la somma dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e quelli della superficie che li rappresenta.

L'interpolazione polinomiale può essere effettuata mediante un insieme di funzioni polinomiali definite localmente all'interno di determinati intervalli e opportunamente raccordate con differenti metodologie. Tale applicazione rappresenta il **metodo delle Spline**, sul quale non ci soffermeremo.

### 3.3 Metodo dell'Inverso della distanza (*Inverse Distance Weighted*)

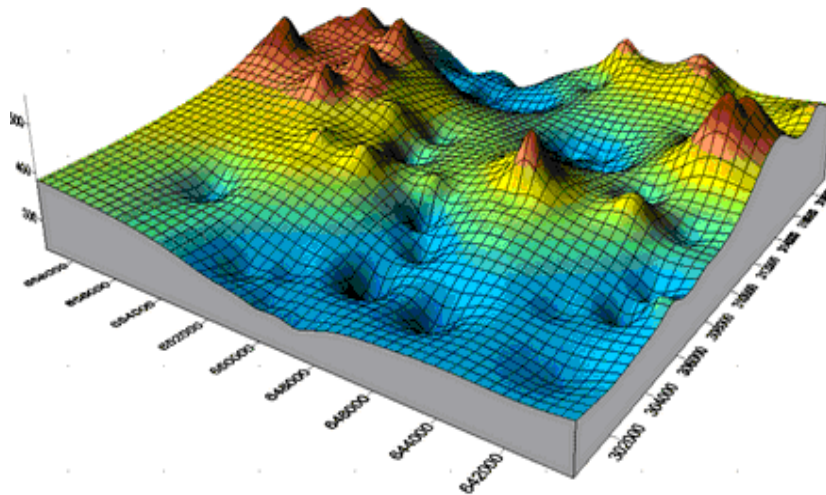
Metodo molto utilizzato che si basa sull'assunzione (realistica per molti fenomeni) che le proprietà in un determinato punto siano più simili a quelle dei punti "vicini", rispetto a quelle di punti più lontani. "*Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*" *Tobler's first law*.

$$E(X_0, Y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N E_i d_{0i}^{-2}}{\sum_{i=1}^N d_{0i}^{-2}}$$

In questo caso i "pesi" che determineranno il valore del punto  $(X_0, Y_0)$  incognito sono inversamente proporzionali al quadrato della distanza dell' $i$ -esimo punto considerato nell'intorno in esame.

Per quanto le assunzioni alla base del metodo IDW siano semplici, nell'applicazione di questo metodo è bene considerare:

- La potenza e il numero dei punti/raggio sorgente da interpolare è arbitraria (nella formula precedente la potenza è 2).
- Non sono effettuate stime dell'incertezza e dell'eventuale errore commesso
- Le superfici ottenute possono contenere numerosi picchi o buche ("bulls eyes") intorno ai dati conosciuti.
- La disposizione spaziale dei campioni non è tenuta in considerazione: punti isolati e cluster hanno la stessa importanza.



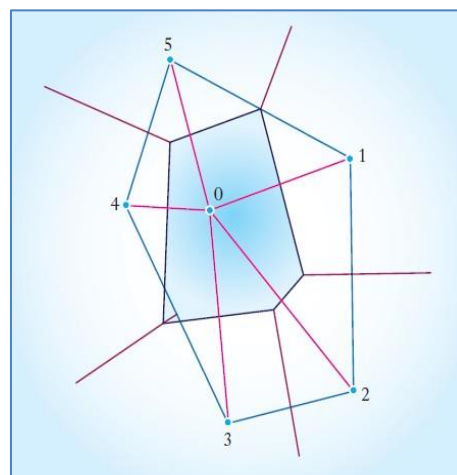
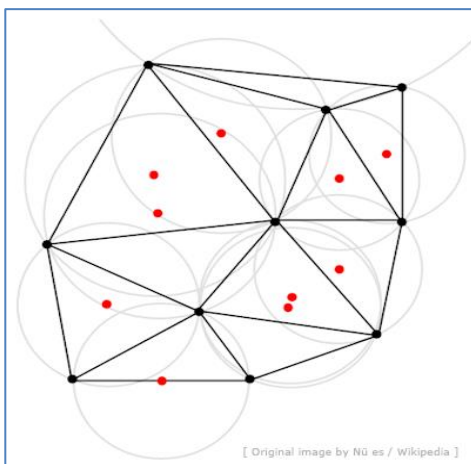
Fonte: [www.Mathworks.com](http://www.Mathworks.com)

Tali aspetti devono essere tenuti in considerazione nella scelta di applicazione del metodo, considerando quanto questi possano alterare la rappresentazione della grandezza fisica in esame.

### 3.4 Metodo dei Poligoni d'influenza (Natural Neighbour Analysis)

Alcune tecniche di interpolazione permettono di definire aree di influenza prima dell'esecuzione dell'interpolazione, in modo tale che la stima di un punto risenta dell'influenza dei valori inclusi all'interno di determinate zone circostanti.

Tale metodo chiamato, Natural Neighbour Analysis è basato nella costruzione preliminare dei cosiddetti Poligoni di Thiessen o di Voronoï o di Dirichlet, che possiamo considerare procedure sostanzialmente equivalenti:



(Fonte: Treccani)

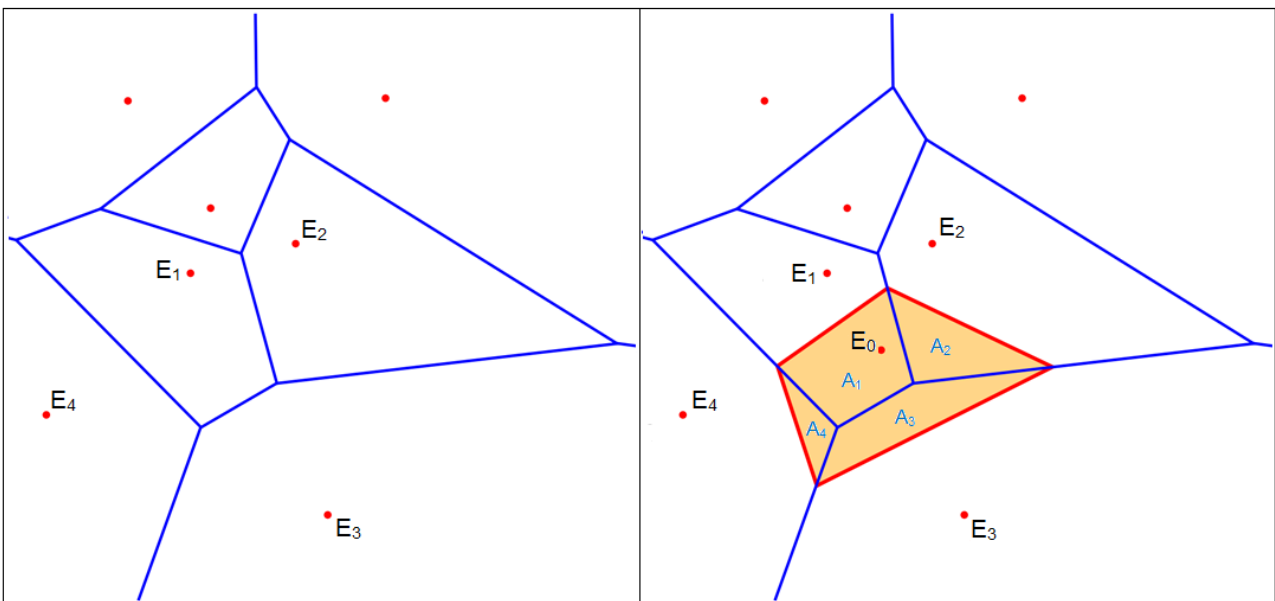
Per individuare i poligoni di Thiessen (Dirichlet) è necessario effettuare preliminarmente la **triangolazione di Delaunay**: questa si ottiene facendo in modo che, per ciascun triangolo, il cerchio passante per i tre vertici non includa nessun altro nodo.

Successivamente i poligoni di Thiessen vengono determinati, individuando i punti medi di ogni lato del triangolo, e tracciando le perpendicolari al lato in entrambe le direzioni. I punti in cui le due perpendicolari si incrociano costituiscono i vertici del poligono di Thiessen.

I dati noti, contribuiscono quindi alla stima di quelli incogniti, in modo proporzionale al rapporto tra l'area del poligono che include questi ultimi, e quella del poligono che comprende il punto noto. In questo modo è possibile calcolare i coefficienti della "media pesata" secondo le aree di influenza dei punti considerati nell'intorno in esame. Il tutto è mostrato con un esempio nelle figure riportate in seguito: in blu è disegnata la tassellatura derivante dalla particolare posizione dei punti di valore noto,  $E_0$  è il valore incognito da calcolare e, infine, con fondo colorato, è mostrato il ri-arrangiamento della tassellatura iniziale in conseguenza dell'aggiunta di quest'ultimo. Si vede che in virtù delle mutue posizioni l'area d'influenza di  $E_0$  si sovrappone a quella originaria di quattro illuminamenti noti più vicini  $E_1, E_2, E_3$  ed  $E_4$ . Allora  $E_0$  si calcolerà allora con la formula seguente:

$$E_0 = \sum_{i=1}^N w_i E_i$$

in cui:  $N = 4$ ,  $A_i$  è l'area di sovrapposizione del poligono originario di  $E_i$  con il poligono di  $E_0$  nella tassellatura modificata,  $A$  è l'area d'influenza di  $E_0$ :  $A = \sum_{i=1}^N A_i$  e infine  $w_i = \frac{A_i}{A}$  è il peso  $i$ -esimo che nella media è applicato a ciascun valore noto.



**Poligoni di Thiessen e sovrapposizione delle aree d'influenza per effetto dell'aggiunta di un ulteriore punto non noto.** (Fonte: Wikipedia, in lingua tedesca; immagini modificate).

Il metodo dei poligoni di influenza, può anche essere applicato ad integrazione di altre metodologie. Tutti i metodi di interpolazione infatti, come detto in precedenza, possono essere applicati globalmente sul dominio di interesse, o localmente su opportuni intervalli. La poligonazione di Thiessen può quindi anche essere utilizzata nelle fasi iniziali per individuare la grandezza più opportuna degli intorno da considerare quali aree di influenza dei punti noti.

### 3.5 Metodi Geostatistici: Kriging

La geostatistica è una branca della statistica applicata che studia i fenomeni che si manifestano su base spaziale. In particolare studia la variabilità spaziale dei parametri che caratterizzano il fenomeno stesso, estrapolando un modello matematico di riferimento (Raspa, 1995). Tale approccio, basato su metodi statistici e probabilistici, ebbe le prime applicazioni negli anni cinquanta in ambito minerario, dall'ingegnere Sudafricano Danie Krige, che lo utilizzò per migliorare la stima di giacimenti minerari (Krige, 1951). Dal suo nome deriva il termine Kriging, diventato ormai sostanzialmente sinonimo di geostatistica.

Successivamente i principi teorici di questa disciplina furono formalizzati dal matematico francese G. Matheron, con la pubblicazione della "teoria delle variabili regionalizzate". (*Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature, 1965*).

Si consideri un fenomeno spaziale. In ogni punto di coordinate  $(x,y)$  dello spazio di osservazione sia data una funzione numerica,  $z(x,y)$ , che lo caratterizza.

In questo contesto si possono dare le seguenti definizioni:

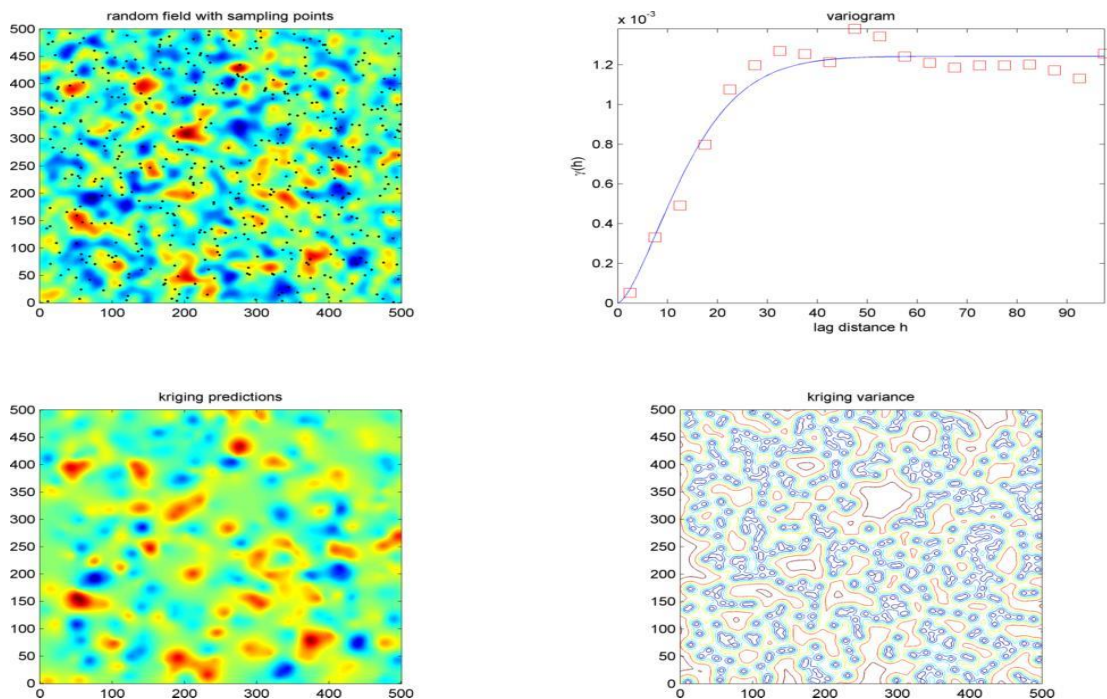
- Variabile **regionalizzata (VR)** Si intende la funzione matematica  $z(x,y)$  precedentemente definita. Il termine regionalizzata specifica che si tratta di una funzione definita su un dominio spaziale, ovvero di una funzione il cui valore dipende dalla localizzazione, espressa normalmente dalle coordinate spaziali.
- **Campo:** È il dominio nel quale la variabile  $z$  è suscettibile di assumere determinati valori ed all'interno del quale si studia la sua variabilità. Coincide con lo spazio di osservazione del fenomeno di studio.
- **Supporto:** È l'entità geometrica sulla quale la variabile  $z$  è definita od anche misurata. Nel caso di una misura il supporto è espresso dalla forma e dimensioni del campione su cui la misura è stata effettuata.

La funzione  $z(x,y)$  è trattata come una variabile casuale (aleatoria) generalmente continua, con una media, una varianza e una funzione di probabilità di densità cumulativa. Questa variabile ha una distribuzione di probabilità da cui viene estratto il valore reale. Se noi conosciamo approssimativamente la distribuzione possiamo stimare i valori nei punti non campionati dai vicini campionati e assegnare gli errori alle predizioni. (G. Raspa, Geostatistica applicata)

Una variabile regionalizzata può assumersi "strutturata spazialmente", possedendo una variazione spaziale di componenti sia deterministiche che casuali.



Partendo quindi da una distribuzione discreta di punti noti (campionati, misurati, calcolati) l'applicazione del kriging ci consente di ottenere l'andamento continuo di una determinata grandezza analizzandone l'autocorrelazione spaziale dei dati.



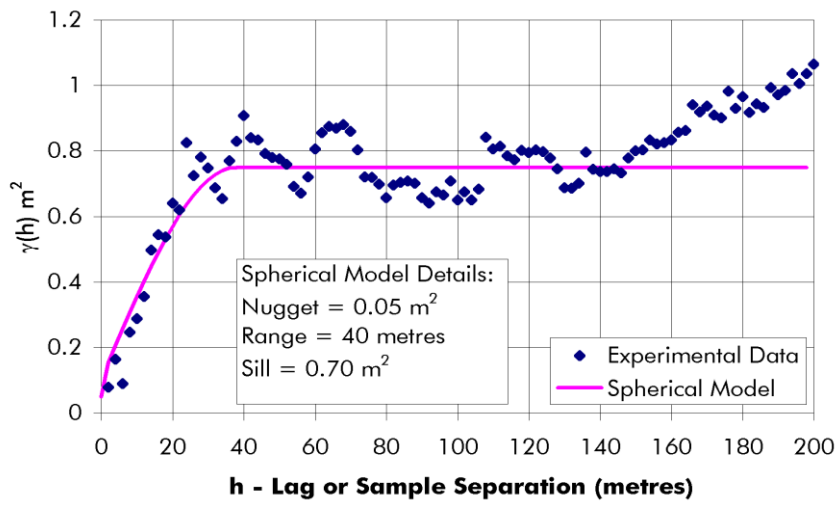
Punti campione ed esempi di variogramma

Fonte: [www.Mathworks.com](http://www.Mathworks.com)

La variabilità spaziale dei dati (misurati o calcolati) è espressa mediante il **variogramma**, che è rappresentato graficamente con la distanza euclidea nello spazio geografico tra le varie coppie di punti del campione considerato. Il variogramma consente di evidenziare il grado di variabilità di punti a distanza crescente, mettendo quindi in relazione la varianza con distanza.

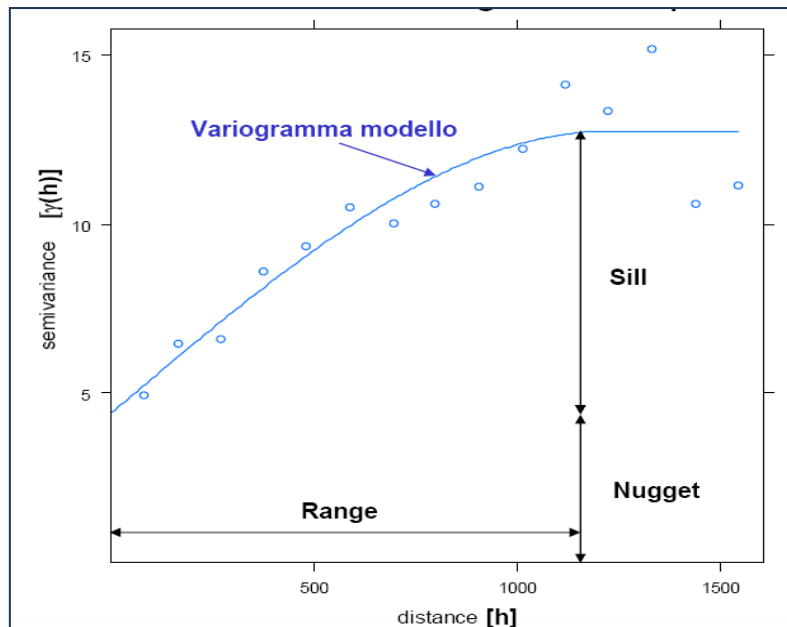
La varianza rappresenta un indice statistico che fornisce una misura di quanto il valore di un campione si discosta dal valore atteso. Nella pratica, per semplicità, si lavora più spesso col semivariogramma, che lavora con distanza e semivarianza ( $\gamma$ ). La semivarianza è la metà della varianza (quadrato della deviazione standard) tra ogni valore  $Z$  e ognuno dei punti alla stessa distanza. Rappresenta la misura della interdipendenza dei valori di  $Z$  basata sulle distanze reciproche tra i punti (una misura del grado di dipendenza spaziale tra i campioni)





Fonte <http://minetechint.com>

Ai dati sperimentali, empirici, andrà poi associata una funzione di riferimento (Variogramma modello), che consentirà l'interpolazione, e mediante la quale saranno ricavati i valori nei punti incogniti, con una **stima alla minima varianza**.



Fonte: ISPRA

Nel grafico possiamo distinguere tre parametri fondamentali

- **Nugget** : variabilità casuale non correlata alla distanza
- **Sill**: variabilità correlata alla distanza
- **Range**: distanza oltre la quale non si osserva più correlazione spaziale

L'analisi del variogramma, e la scelta opportuna dei suddetti parametri rappresentativi, permette di quantificare la variabilità spaziale dei dati sperimentali in esame ed individuare una funzione interpolante.

Per quanto appena detto possiamo riepilogare le principali caratteristiche del kriging :

- I pesi da attribuire ai punti misurati dipendono non solo dalla distanza tra essi e il punto da predire ma anche dall'andamento dell'autocorrelazione spaziale definita dal variogramma.
- I pesi (coefficienti) sono scelti in modo tale da rendere minima la varianza dell'errore di stima (*Minimum-variance unbiased estimator, MVUE*)
- Il raggio di ricerca (neighborhood) è in prima analisi il valore del range.
- I pesi dipendono inoltre dalla configurazione spaziale delle misure: maggiore è la varianza di nugget, più bassi risultano i pesi assegnati ai punti vicini.
- I pesi relativi dipendono dalla dimensione del raggio di ricerca (neighborhood): all'aumentare di questa i pesi dei punti vicini diminuiscono e aumentano quelli dei punti più lontani

Il kriging permette di superare molte delle limitazioni proprie dei metodi tradizionali di interpolazione; per esempio, i pesi nel kriging non sono arbitrariamente fissati, ma determinati dal modello di variogramma e dalla configurazione geometrica dei dati. (A. Castrignano' G. Palumbo, D. DE Benedetto )

Oltre alla stima del valore, il kriging può stimare l'errore associato al valore interpolato offrendo una misura dell'incertezza della predizione effettuata, indicativa della qualità dell'interpolazione. (V. Noti, *Geostatistica ed interpolazione spaziale*)

La tabella riportata di seguito, mostra uno schema di riepilogo dei vari metodi di interpolazione, evidenziandone le caratteristiche ai fini applicativi:

## A Comparison of the Geostatistical Analyst methods

Method	Deterministic/ Stochastic	Output Surface Types	Computing Time/ Modeling Time <sup>1</sup>	Exact Interpolator	Advantages	Disadvantages	Assumptions <sup>2</sup>
Inverse Distance Weighted	Deterministic	Prediction	Fast/Fast	Yes	Few parameter decisions	No assessment of prediction errors; produces "bulls eyes" around data locations	None
Global polynomial	Deterministic	Prediction	Fast/Fast	No	Few parameter decisions	No assessment of prediction errors; may be too smooth; edge points have large influence	None
Local polynomial	Deterministic	Prediction	Moderately Fast/Moderate	No	More parameter decisions	No assessment of prediction errors; may be too automatic	None
Radial basis functions	Deterministic	Prediction	Moderately Fast/Moderate	Yes	Flexible and automatic with some parameter decisions	No assessment of prediction errors; may be too automatic	None
Kriging	Stochastic	Prediction; Standard Errors; Probability; Quantile	Moderately Fast/Slower	Yes without measurement error; No with measurement error	Very flexible; allows assessment of spatial autocorrelation; can obtain prediction standard errors; many parameter decisions	Need to make many decisions on transformations, trends, models, parameters, and neighborhoods	Data comes from a stationary stochastic process, and some methods require that the data comes from a normal distribution
Cokriging	Stochastic	Prediction; Standard Errors; Probability; Quantile	Moderate/ Slowest	Yes without measurement error; No with measurement error	Very flexible; can use information in multiple datasets; allows assessment of spatial cross- correlation; many parameter decisions	Need to make many decisions on transformations, trends, models, parameters, and neighborhoods	Data comes from a stationary stochastic process, and some methods require that the data comes from a normal distribution

1. Computing time is computer-processing time to create a surface. Modeling time includes user-processing time to make decisions on model parameters and search neighborhoods.  
2. We assume that all methods are predicting a smooth surface from noisy data.

## 4. Applicazione dei diversi modelli: le mappe d'illuminamento naturale

Nel presente lavoro il problema è così posto: sono noti, perché già calcolati, i valori dell'illuminamento naturale mensili e annuo in corrispondenza della posizione geografica dei centroidi di tutti i comuni italiani e si vogliono ottenere mappe mensili e annue dell'illuminamento naturale a partire da essi. In base alla scala digitale adottata per le mappe, ogni pixel è rappresentativo di una porzione di territorio di circa  $1.5 \text{ km}^2$  e, poiché l'estensione media dei comuni italiani è poco meno di  $40 \text{ km}^2$ , occorre assegnare per interpolazione geografica i valori d'illuminamento a una frazione di pixel pari a circa 27 su 40. **Come spiegato nel capitolo precedente, sono disponibili numerosi metodi d'interpolazione e si tratta di scegliere quello più appropriato. Nel nostro caso, si vuole riprodurre in maniera plausibile l'andamento spaziale dell'illuminamento e ritrovare i valori esatti, o affetti da errori accettabili, nei punti in cui questi sono già noti.**

Non esiste il metodo ottimo per ogni circostanza e perciò l'esercizio qui effettuato è consistito nell'applicarne alcuni (fra i più promettenti) al nostro caso e studiarne le differenze. Per facilitare questo compito, è stato deciso di diradare i punti noti da utilizzare, in quanto se la densità di questi ultimi fosse elevata<sup>2</sup>, le differenze fra un metodo e l'altro si attenuerebbero decisamente e, al limite, tutti i metodi fornirebbero valori esatti o con errori accettabili, impedendo di discernere quello che si presta meglio per mostrare il *campo* della luminosità naturale che qui si vuole studiare. A questo scopo sono stati selezionati i centroidi di (sole) 49 città, fra le più importanti, a cui sono stati aggiunti 122 punti per le aree esterne all'Italia – mari e stati confinanti – in modo che le zone di confine siano interpolate correttamente. Le città risultano posizionate casualmente, mentre i punti esterni sono stati scelti con passo regolare. Nella figura A sono mostrati i punti geografici utilizzati per le interpolazioni; per alcuni è anche indicato il nome della città.

Nel seguito, a partire dalla figura B, sono riportate le mappe d'illuminamento ricavate applicando i diversi metodi d'interpolazione geografica descritti nel capitolo precedente, allo scopo di evidenziarne caratteristiche e differenze. Per completezza d'informazione, anche se al fine qui perseguito non è essenziale, va detto che il parametro utilizzato per questo esercizio è quello dell'illuminamento luminoso globale orizzontale riferito all'intervallo orario 0÷24 [6]. La palette di conversione dati/colori è la stessa per tutte le mappe presentate ma la legenda è mostrata solo in una su esse<sup>3</sup> (figura B).

La figura B riporta il risultato dell'interpolazione con il metodo più elementare, detto del **vicino più prossimo** (*Nearest Neighbor*): in ogni pixel non noto è ricopiato il valore uguale del pixel noto ad esso spazialmente più vicino. Questo metodo è computazionalmente semplicissimo ma crea degli andamenti innaturali, con aree poligonali uniformi e salti bruschi fra un poligono e l'altro. I poligoni possono essere irregolari, dipendendo strettamente dalla posizione reciproca dei punti noti. In verità le cose stanno diversamente: sappiamo da considerazioni di fisica dell'atmosfera che l'andamento spaziale di ogni grandezza meteorologica è regolare

<sup>2</sup> Come in effetti si avrebbe se si considerassero i centroidi di tutti i (circa 8000) comuni.

<sup>3</sup> Differisce, comunque, da tutte le palette utilizzate per le mappe presentate nel rapporto principale di questa annualità (già licenziato).

e senza evidenti segni di discontinuità fra una zona e l'altra. Nella figura sono mostrati anche i centroidi dei dati noti, che si posizionano ovviamente all'interno dei poligoni. In figura C è riportata la mappa ottenuta con lo stesso metodo, con il campo dell'illuminamento disegnato in tutta l'immagine e non solo per il territorio italiano: si può osservare che i poligoni esterni all'Italia sono esagoni regolari in quanto il reticolo dei dati noti è qui scelto con passo regolare.

Un espediente per attenuare la *granulosità spaziale* del Nearest Neighbor consiste nell'aumentare – quando ciò è possibile – la densità dei punti noti: La figura D mostra ancora lo stesso metodo, ma ora i punti noti sono 243 per l'Italia 719 all'esterno di essa: si può notare un netto miglioramento rispetto all'andamento con soli 49 + 122 punti.

La mappa di figura E è ottenuta con il metodo della **media mobile**. Il valore di ogni pixel non noto è ora calcolato semplicemente come media dei valori dei 5 punti noti più vicini. Si può constatare che non sono ancora scomparsi gli artefatti discontinui nel passaggio da una fascia uniforme all'altra ma, rispetto al metodo precedente, è peggiorata la precisione: nei punti già noti, il valore calcolato (come media) differisce ovviamente da quello di partenza.

La figura F mostra il risultato che si ottiene ricorrendo all'**interpolazione polinomiale**, nella fattispecie di secondo grado, con parametri calcolati mediante regressione ai minimi quadrati. Questo metodo non è *esatto*: è utile solo per individuare un eventuale trend<sup>4</sup>. Si vede che l'illuminamento dipende in prima approssimazione dalla latitudine, diminuendo dal Sud al Nord. Qui un unico polinomio interpolatore è stato applicato a tutti i punti della mappa ma in alternativa, per migliorare la precisione, come è già stato accennato nel capitolo precedente, l'interpolazione polinomiale può essere effettuata mediante un insieme di funzioni polinomiali definite localmente all'interno di determinate zone e opportunamente raccordate ai confini (metodo delle *Spline*).

La figura G mostra il risultato dell'applicazione del metodo dell'**inverso della distanza** (*Inverse Distance Weighted, IDW*). Il metodo IDW è esatto; inoltre, l'andamento spaziale è finalmente regolare, sebbene siano evidenti alcune forme innaturali intorno a punti noti, come le isolinee circolari che delimitano un "picco" o una "buca". Questo artefatto può essere attenuato aumentando la densità dei punti noti, come è stato fatto per le mappe inserite nel rapporto principale di questa annualità, in cui per punti noti sono stati presi i centroidi geografici di tutti i comuni italiani.

La suddivisione in poligoni di Thiessen vista in precedenza fornisce la base per modelli interpolanti più accurati rispetto a quello del vicino più prossimo. In base alla regola di Thiessen, ogni poligono rappresenta l'area d'influenza del punto noto che lo contiene. Con il metodo delle **aree d'influenza (pesate) dei punti vicini** (*Natural Neighbour*) ad ogni pixel non viene assegnato il valore del punto noto più vicino, bensì la media dei valori dei punti vicini, pesati in base al grado di sovrapposizione delle rispettive aree d'influenza (com'è spiegato nel capitolo precedente). Il risultato è mostrato in figura H. Questo metodo ha molti pregi: **a)** sotto l'aspetto concettuale, i valori interpolati dipendono in modo naturale dai punti noti più vicini e dalla posizione reciproca di questi<sup>5</sup>; **b)** fornisce un andamento graficamente plausibile del campo luminoso presente sul

---

<sup>4</sup> Per metodo *esatto* s'intende il metodo che ri-assegna ai punti noti, in virtù dell'interpolazione, gli stessi valori di partenza. Il metodo della media mobile è, evidentemente, esatto.

<sup>5</sup> E non unicamente dalle distanze fra pixel incognito e ciascun punto noto vicino (come avviene ad esempio per IDW).

territorio – esso appare regolare anche in presenza di punti noti posizionati a caso e appare privo di evidenti artefatti legati alla (poca) numerosità; infine, **c**) è un metodo esatto e non dipende dalla calibrazione di alcun parametro arbitrario. A suo svantaggio va detto che, sebbene sia concettualmente semplice, richiede tempi di calcolo più lunghi rispetto agli altri metodi in quanto, per ogni pixel da calcolare, occorre ridisegnare nuovamente la tassellatura poligonale di volta in volta modificata per la sovrapposizione della nuova area d’influenza.

Tutti gli esempi di mappe d’illuminamento mostrati finora ricorrono a metodi *deterministici*, in cui i valori dei punti noti sono ritenuti esatti e, anzi, il metodo viene detto *esatto* se in corrispondenza dei punti noti, in virtù dell’interpolazione, il calcolo restituisce proprio i valori di partenza. Sono deterministici esatti i metodi del vicino più prossimo, dell’inverso della distanza e delle aree d’influenza (pesate) dei punti vicini; deterministici approssimati sono invece quello della media mobile e dell’interpolazione polinomiale. Contrariamente ai metodi deterministici, in quelli stocastici – qui detti *geostatistici* – si assume a priori che i valori dei punti noti possano essere affetti da errore e i metodi si propongono esplicitamente di fornire sia la stima del valore vero sia quella della varianza dell’errore. Il metodo geostatistico per antonomasia è il **kriging**; di esso esistono diverse varianti, ottimizzati per i differenti tipi di distribuzioni possibili al suolo dei parametri studiati (distribuzione graduale, con concentrazioni discontinue a ‘pepita’ ecc.). Nel caso dell’illuminamento naturale sulla regione italiana, il suo andamento più che regolare e privo di gradienti pronunciati fa sì che tutte le varianti conducano sostanzialmente allo stesso risultato, e questo si dimostra insensibile anche al tipo di semivariogramma scelto. Questi pregi sono davvero preziosi nel nostro caso perché, come si è già detto, dovendo redigere decine e decine di mappe per i differenti tipi di illuminamento, per ciascuno dei dodici mesi dell’anno e per diversi intervalli d’uso degli ambienti in cui l’apporto naturale della luce è considerato, sarebbe praticamente impossibile calibrare i singoli parametri insiti nel metodo – semivariogramma, densità dei punti noti, numero di punti vicini da considerare ecc. – per ciascuna situazione. La figura I mostra la mappa d’esempio ottenuta allora con il **kriging ordinario**. Come si può constatare, il risultato è simile sotto l’aspetto visivo a quello del metodo delle aree d’influenza (pesate) dei punti vicini, che era stato giudicato il migliore dei metodi deterministici, ma il valore aggiunto del kriging rispetto ai metodi precedenti consiste nella possibilità di valutare l’entità dell’errore che si commette considerando i valori interpolati rispetto a quelli “veri” (che, però, per definizione, sono incogniti).



Figura A. Distribuzione geografica dei punti noti utilizzati per l'interpolazione.

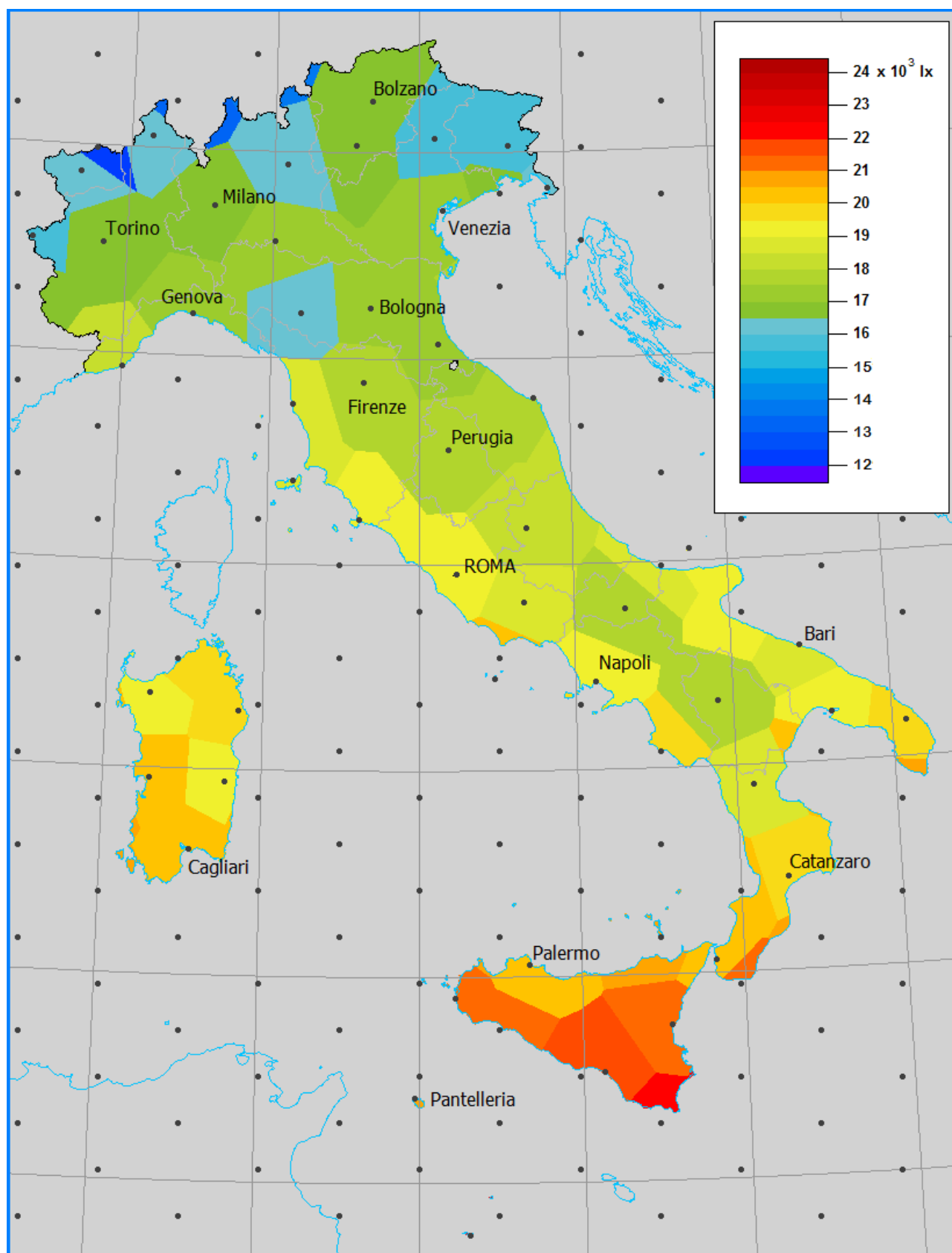


Figura B. Interpolazione con il metodo Nearest Neighbor (Il vicino più prossimo).



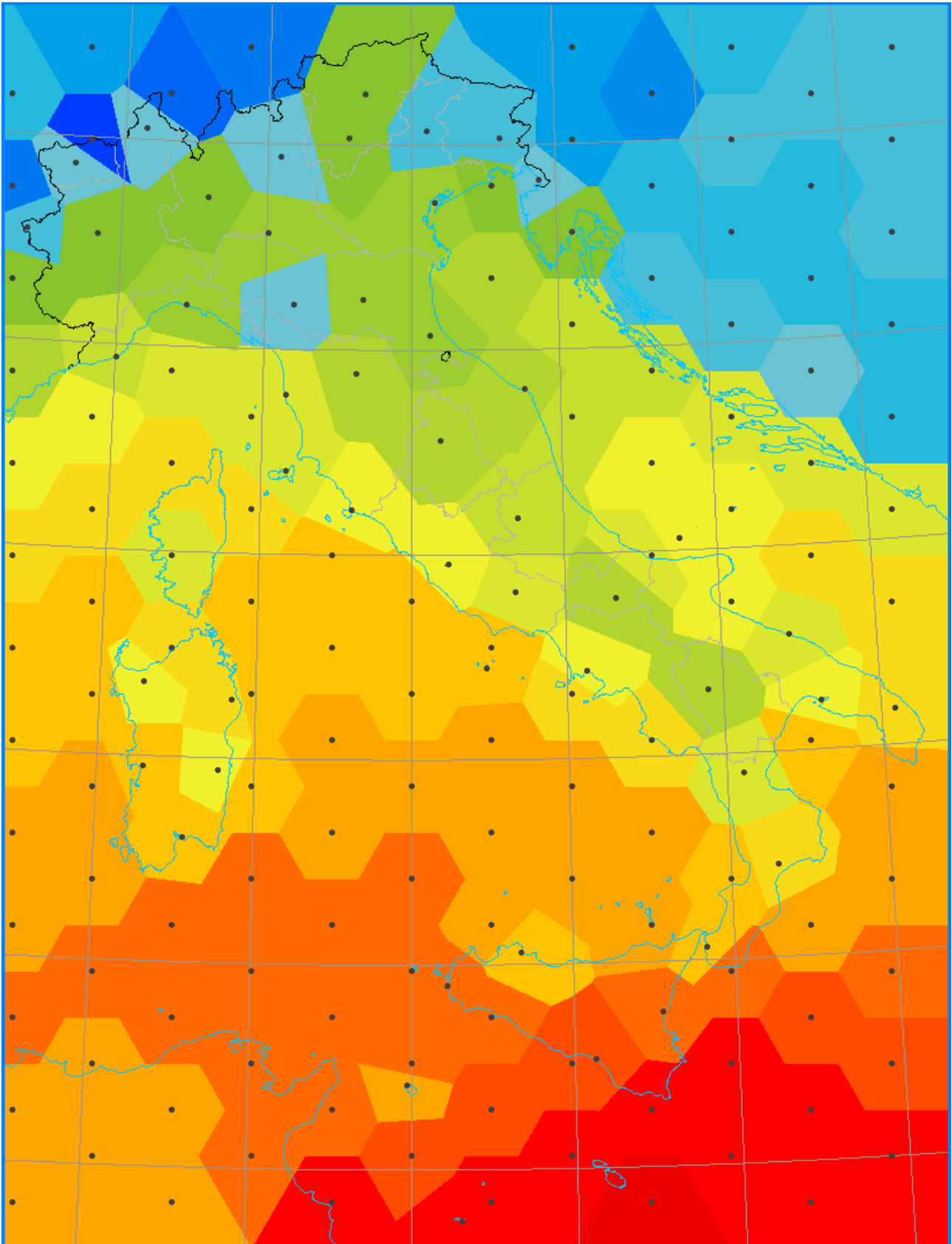


Figura C. Interpolazione con il metodo Nearest Neighbor (Il vicino più prossimo).

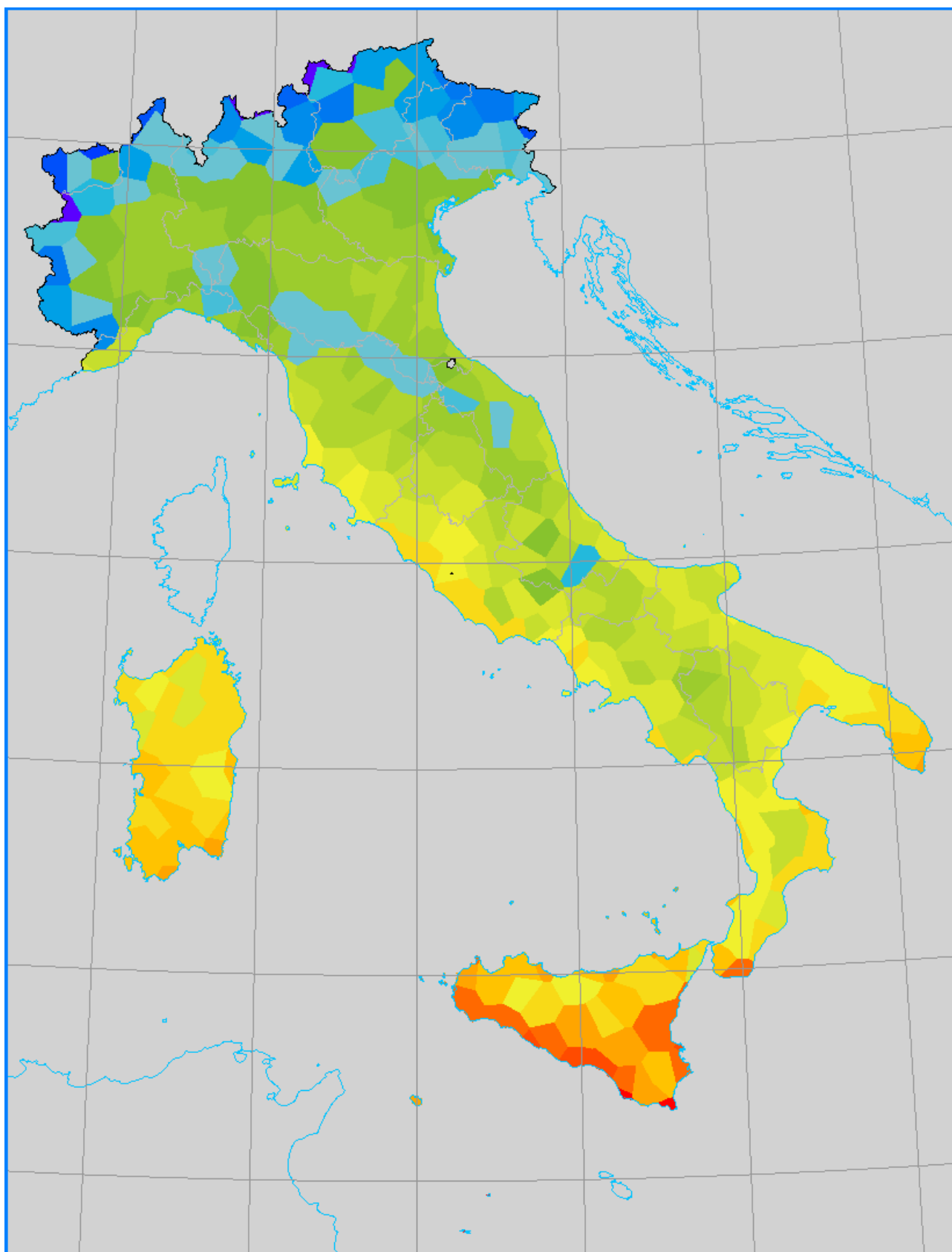


Figura D. Interpolazione con il metodo Nearest Neighbor (Il vicino più prossimo), ma con un maggior numero di punti noti.



**Figura E. Interpolazione con il metodo della media mobile.**

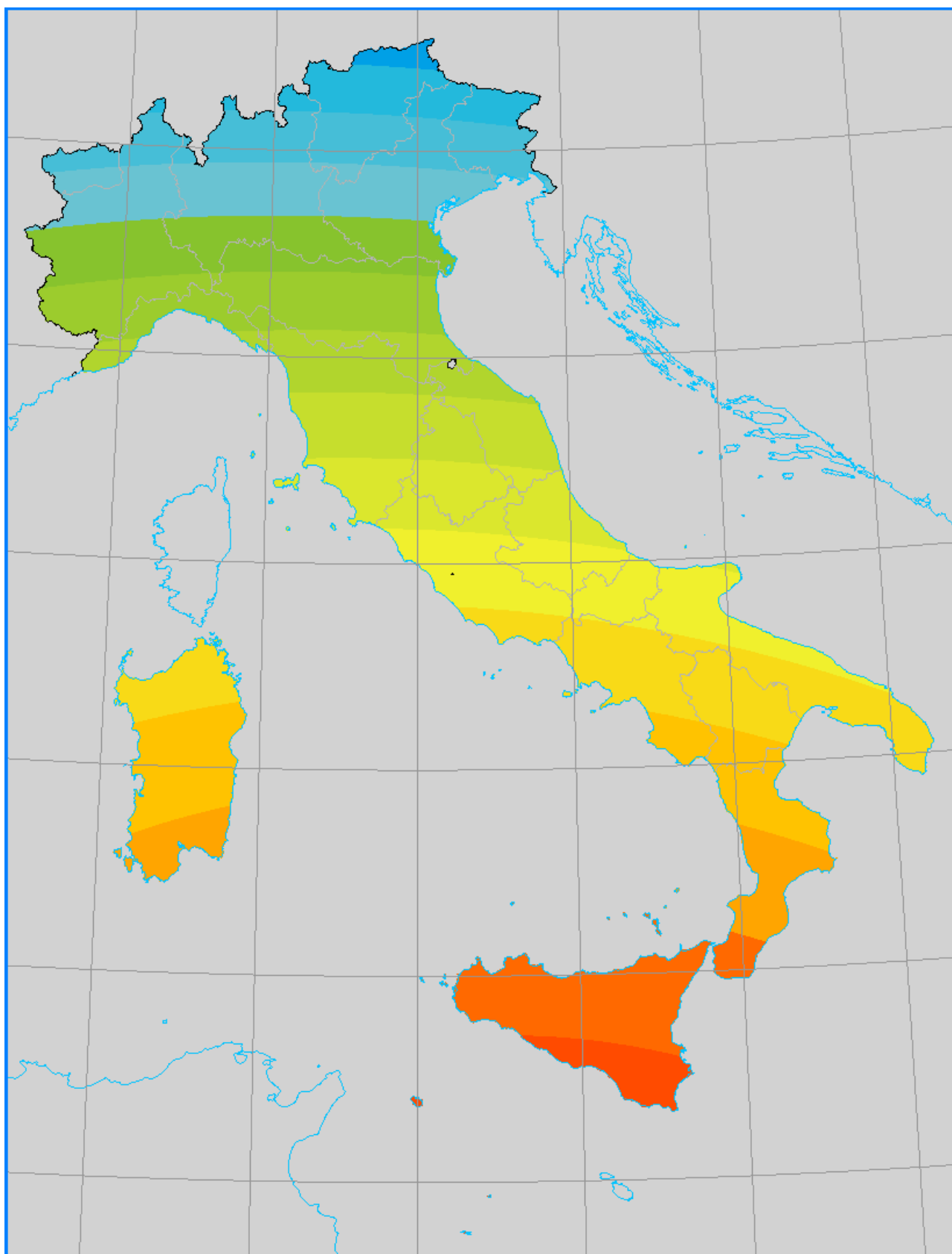


Figura F. Interpolazione con il metodo polinomiale quadratico.

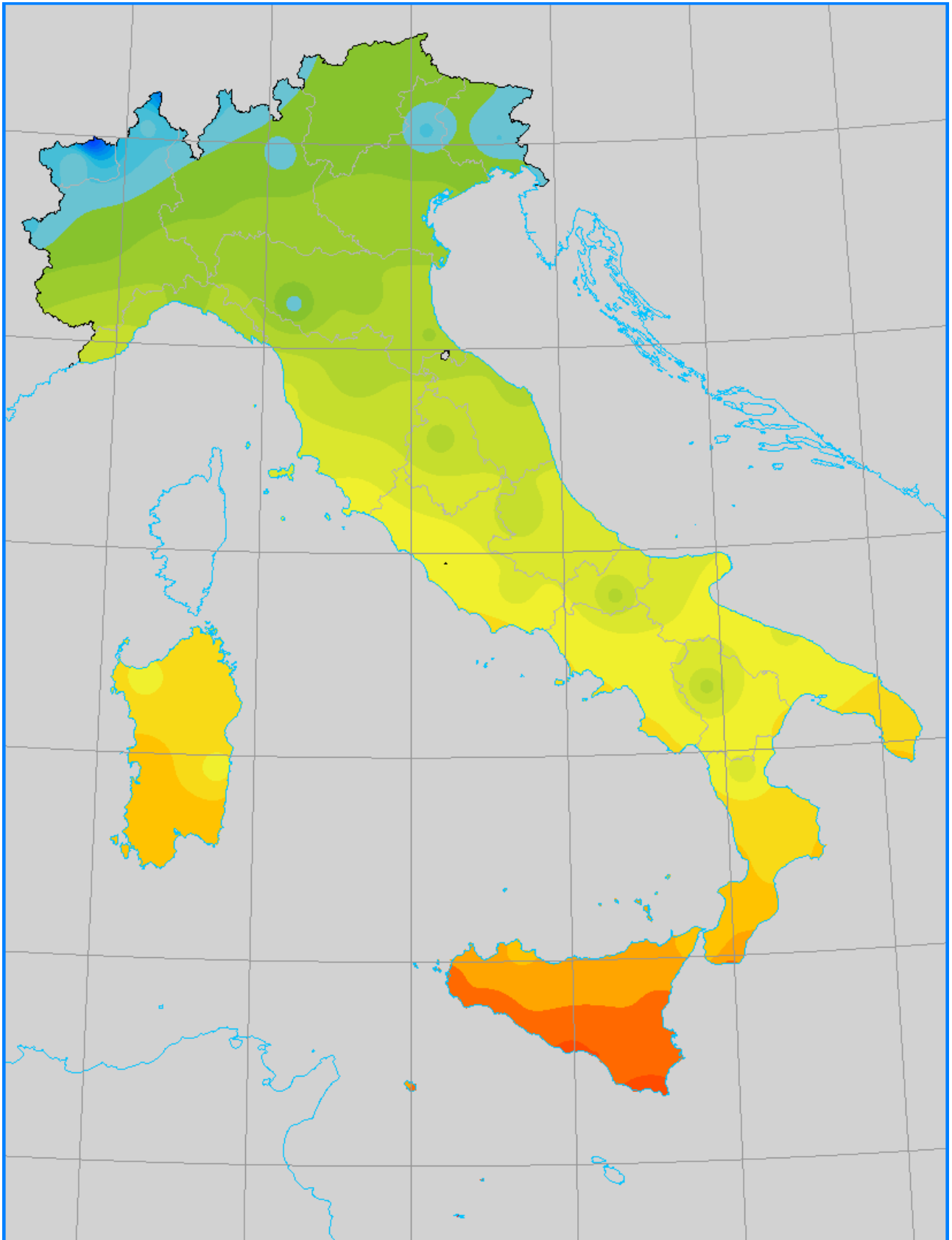


Figura G. Interpolazione con il metodo dell'inverso della distanza (Inverse Distance Weighted, IDW).

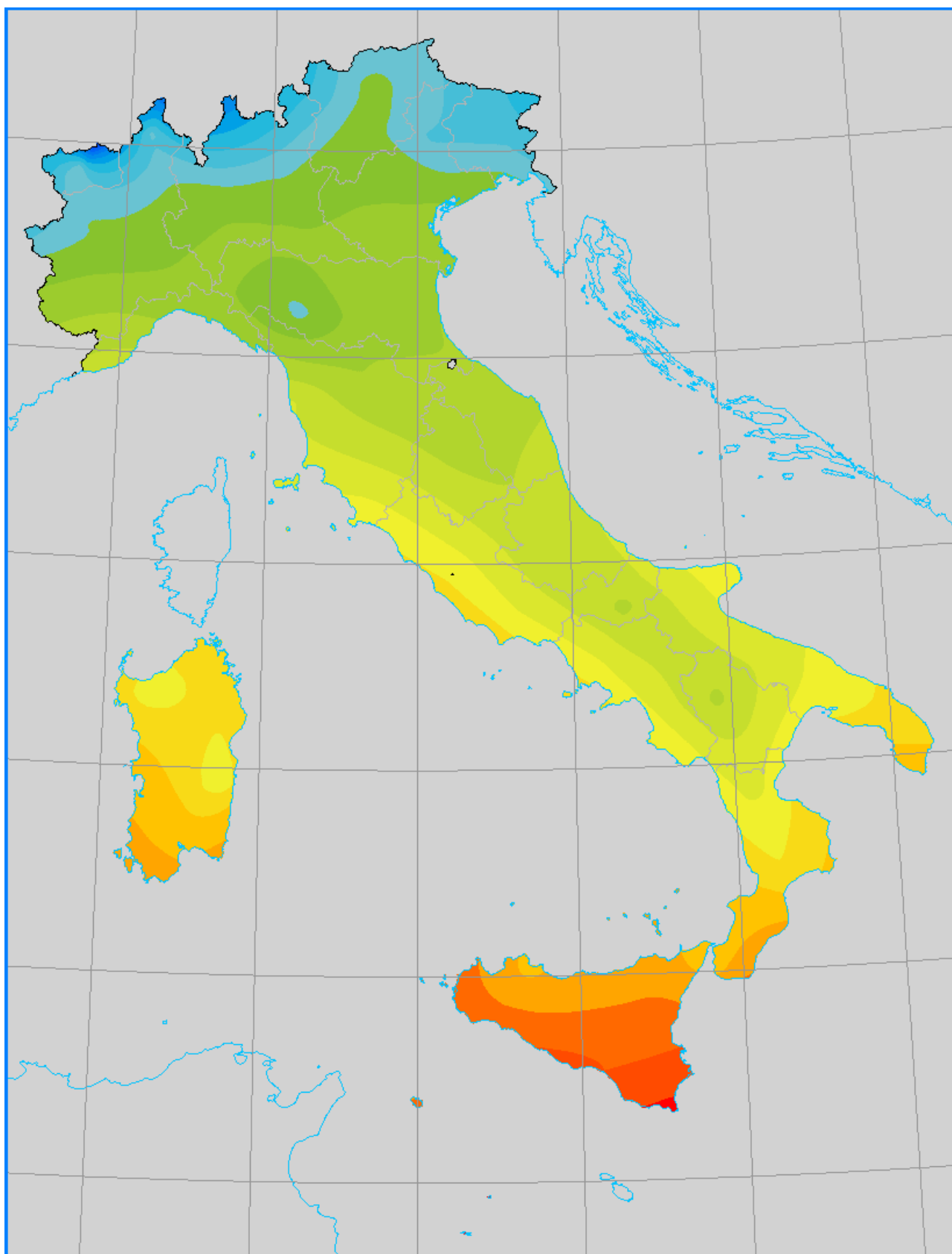


Figura H. Interpolazione con il metodo delle aree d'influenza.

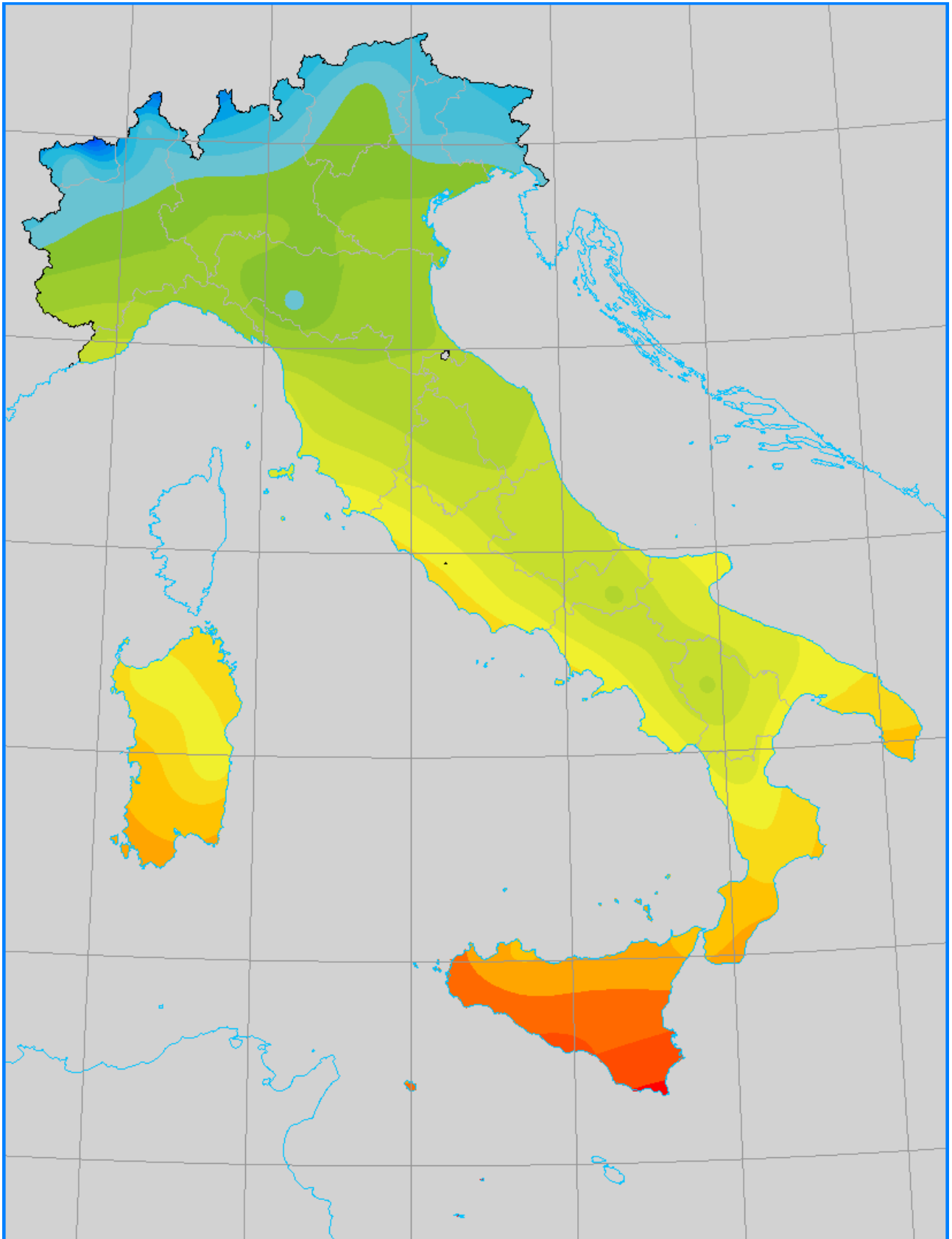


Figura I. Interpolazione con il metodo del kriging ordinario.

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di approfondimento svolto, dà seguito ed integra, la più ampia attività svolta dall'ENEA finalizzata a mettere a punto strumenti di calcolo, per una valutazione più puntuale del contributo della luce naturale negli edifici e la conseguente riduzione del fabbisogno energetico degli stessi, in particolare per gli nZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*). L'utilizzo di una metodologia Climate Based (CBDM) consente, tra l'altro, di migliorare quanto attualmente previsto dalla normativa tecnica vigente (UNI 15193), la quale ricorre a metodi semplificati o non sufficientemente accurati.

Con il lavoro svolto nella corrente annualità, PAR2017, della Ricerca di Sistema Elettrico, il database dell'*illuminamento naturale relativo alla regione italiana* è stato arricchito grazie all'allestimento di mappe tematiche che rappresentano l'illuminamento medio mensile e quello medio annuo sull'intera regione italiana. Ne sono state prodotte 52, ossia 13 (12 mensili + 1 annua) ma duplicate in 4 versioni: da un lato, per rappresentare la componente globale e diffusa; dall'altro, in relazione alle due fasce orarie 0÷24 e 8:00 ÷ 18:00 (quest'ultimo utile per gli uffici). Per quanto riguarda l'archiviazione digitale, ciascuna delle 12 mappe è stata infine allestita in due copie: testo (tabella numerica) e grafico (TIFF).

Nell'estensione sono state invece analizzate e confrontate differenti metodologie di interpolazione di dati, da applicarsi per l'elaborazione delle mappe di illuminamento naturale estese all'intero territorio nazionale.

Tra i differenti metodi sono stati considerati: Metodi Deterministici quali: *Media mobile Inverso delle distanze (Inverse Distance Weighted-IDW)*, *Interpolazioni Polinomiali*, *Spline*. *Poligoni di influenza (Nearest Neighbour Analysis-NNR)*, e metodi Geostatistici: *Kriging*, decrivendone le assunzioni e le implicazioni di calcolo.

L'illuminamento naturale, a differenza di altri parametri meteorologici, quali la temperatura, che dipende fortemente anche da condizioni microclimatiche locali, presenta un andamento spaziale regolare: a scala globale mostra in prima approssimazione un trend che riproduce il gradiente della latitudine – valori più elevati a latitudini basse (Sud) e più bassi a latitudini elevate (Nord)<sup>6</sup>, mentre a scala più locale segue con gradualità gli accidenti orografici della regione italiana. Un metodo d'interpolazione geografica buono per l'illuminamento:

- a) deve riprodurre l'andamento appena descritto;
- b) deve comportare, se si tratta di un metodo non esatto, piccoli errori per i valori interpolati nei punti già noti in partenza;
- c) non deve dipendere criticamente dai parametri necessari alla formulazione del modello – come l'esponente nel modello dell'inverso della distanza, il numero di punti noti vicini da considerare nei modelli 'locali', la particolare forma del semivariogramma ecc. – in quanto la loro calibrazione può essere sì soddisfacentemente ottimizzata di volta in volta per singole immagini, ma questa operazione è poco pratica quando si devono elaborare tutte insieme decine di mappe;
- d) deve avere un costo computazionale accettabile.

Mettendo assieme queste esigenze, i metodi idonei al nostro caso si sono rivelati:

---

<sup>6</sup> In termini relativi questa affermazione è più vera per l'illuminamento globale e meno per quello diffuso.



- 1) metodo dell'inverso della distanza (a patto di prevedere una densità sufficiente di punti noti);
- 2) metodo del kriging (in una qualunque delle sue versioni);
- 3) metodo delle aree d'influenza (pesate) dei punti vicini.

Come si è già detto, le 52 mappe presentate nel rapporto principale di questa annualità della Ricerca di sistema sono state redatte ricorrendo al metodo dell'inverso della distanza; quelle inserite nel sito Internet dell'atlante, con il kriging.

## Sigle e abbreviazioni

AMT	Anno meteorologico tipico
AMTIN	Anno meteorologico tipico per l'illuminamento naturale
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
IDW	Inverse Distance Weight (metodo dei valori pesati con l'inverso della distanza)
NNR	Nearest Neighbour Analysis
SK	Simply Kriging
OK	Ordinary Kriging
OLS	Ordinary Least Squares
MVUE	Minimum-variance unbiased estimator,
MISE	Ministero dello sviluppo economico
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings / Edifici a consumo energetico quasi nullo
TIFF	Tagged Image File Format
UTM	[proiezione] Universale trasversa di Mercatore

## Bibliografia / References

- [1] F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro, P. Signoretti, Costruzione degli anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale (AMNTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici, ENEA, RdS/PAR2014/085
- [2] A. Mangione, F. Spinelli, D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni, M. Zinzi, Impact of Different Luminous Efficacy Models on a Climate Based Method for the Calculation of Lighting Energy Use in Not Residential Buildings, International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies – CONECT 2016", Riga, Lettonia, Ottobre 2016.
- [3] F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro, P. Signoretti, Definizione di un modello nazionale di efficacia luminosa mediante la misura dei valori di illuminamento naturale e di radiazione solare in tre località italiane, ENEA, RdS/PAR2015/124
- [4] F. Spinelli, D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni e M. Zinzi (2017), "Analysys of Daylight Availability in Italy trough Different Luminous Efficacy Models", *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry – SHC 2017*, Abu Dhabi, October 2017
- [5] V. Cima, R. Maseroli e L. Surace (2003), "Il processo di georeferenziazione dal telerilevamento ai GIS", Atti della 7a Conferenza nazionale ASITA, Verona, 28-31 ottobre 2003.
- [6] F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro e P. Signoretti (2018), *L'atlante italiano dell'illuminamento naturale. Produzione delle mappe d'illuminamento per differenti orari d'uso degli ambienti e ampliamento del sito Solaritaly dell'ENEA con la realizzazione d'una nuova sezione dedicata ai dati dell'illuminamento naturale*, Rapporto ENEA – Ricerca di Sistema Elettrico, Roma, settembre 2018, RdS/PAR2017/139.
- [7] G. Matheron, *The theory of regionalized variables and its applications*, volume 5. Ecole nationale superieure des mines de Paris, 1971.

## Web references

- [8] A Vecchio, M. Falconi Approfondimenti di statistica e geostatistica ISPRA,
- [9] Laboratorio di Geodesia, Geomatica e GIS, *Digital Terrain models* -Università degli Studi di Genova (Dispense)
- [10] G. Raspa, *Geostatistica Applicata* (Dispense)
- [11] G. Raspa, *Calcolo delle Probabilità e Geostatistica*, Dispense corso Ingegneria per l'Ambiente e Territorio Università di Roma "La Sapienza".

- [12] G. Raspa, *Il ruolo della geostatistica nella modellistica ambientale*
- [13] V. Noti, *Geostatistica ed interpolazione spaziale*
- [14] F. Migliaccio, A. Albertella, *Metodi e modelli di interpolazione di dati geografici* Politecnico di Milano
- [15] A. Castrignanò, G. Palumbo, D. DE Benedetto *Il campionamento*